

Programm Lebensgrundlage Umwelt
und ihre Sicherung (BWPLUS)

Zwischenbericht anlässlich des Statuskolloquiums
Umweltforschung Baden-Württemberg 2015

am 24. und 25. Februar 2015
im Haus der Wirtschaft in Karlsruhe

Stromoptimierter Betrieb von KWK-Anlagen durch intelligentes Wärmespeichermanagement

von

Daniel Lödige, Bernd Thomas*, Christine Widmann

Hochschule Reutlingen, Reutlingen Research Institute (RRI)
Alteburgstr. 150, 72762 Reutlingen

*: Tel.: 07121/271-7041, email: bernd.thomas@reutlingen-university.de

Förderkennzeichen: BWE 13002
Laufzeit: 01.12.2012 – 30.11.2015

Reutlingen, 8.1.2015

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des
Landes Baden-Württemberg gefördert

Kurzfassung

Die zunehmende erneuerbare Stromerzeugung erfordert Anstrengungen, um den Angebotsschwankungen und der Verteilungsproblematik entgegen zu wirken. Eine dezentrale und am Bedarf orientierte Stromerzeugung mittels Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) kann einen wesentlichen Beitrag leisten, um diese Schwankungen auszugleichen und die Netze zu entlasten. Zu diesem Zweck ist aber ein Steuerungssystem für die KWK-Anlagen erforderlich, das sowohl für die Deckung des Wärmebedarfs im Objekt sorgt, als auch gewährleistet, dass die elektrische Energie genau zu den Zeiten erzeugt wird, zu denen sie im Objekt benötigt wird. Die Entkopplung von Stromerzeugung und Deckung des Wärmebedarfs kann dabei über den standardmäßig vorhandenen Wärmespeicher erfolgen. Dieser stellt damit das zentrale Element der Gesamtanlage dar, für die das Steuerungssystem zur Eigenstromoptimierung im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelt und erprobt werden soll.

Im Rahmen des vorliegenden Zwischenberichtes werden die Ergebnisse des 2. des auf insgesamt drei Jahre angelegten Forschungsprojektes vorgestellt. Im Einzelnen sind die Themen Prognose, Bestimmung des Energieinhaltes im Wärmespeicher, stromoptimiertes Steuerungssystem, Aufbau der Feldtestanlagen, Simulation und sozialwissenschaftliche Begleitforschung beschrieben.

Bei den umfangreichen Arbeiten zur Wärme- und Strombedarfsprognose hat sich gezeigt, dass die naive Prognose, die auf der Übernahme der Daten der Vortage beruht, aufgrund des starken Einflusses des individuellen Nutzerverhaltens eine nur schwer zu verbessernde Vorhersagegüte aufweist. Zur Bestimmung des Energieinhaltes im Wärmespeicher wird eine Sigmoidfunktion zur Beschreibung des Temperaturverlaufs über der Speicherhöhe verwendet. Schwierig ist dabei die Anpassung der vier Funktionsparameter mit nur drei Temperaturmesswerten, was jedoch durch geeignete Randbedingungen erreicht werden kann. Das stromoptimierte Steuerungssystem verwendet die Wärmebedarfskurven bei minimalem und maximalem Energieinhalt des Wärmespeichers als Begrenzungen des Optimierungsbereiches, um so die Deckung des Wärmebedarfs zu jeder Zeit zu gewährleisten. Die zwei im Projekt zur Verfügung stehenden Feldtestanlagen wurden mit zusätzlicher Mess- und Steuerungstechnik nachgerüstet, um das entwickelte Steuerungssystem implementieren und testen zu können. Das Simulationsmodell ist im Hinblick auf verschiedene Speicherkonfigurationen erweitert und auf Basis am BHKW-Prüfstand der Hochschule gewonnener Versuchsdaten verifiziert worden, und im Zuge der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung werden die Ergebnisse einer im Rahmen des Projektes angefertigten Studie zu den Hemmnissen der KWK vorgestellt.

Abstract

The increasing renewable power generation requires efforts to cope with the fluctuations in power supply and the associated distribution problems. A decentralized electricity generation using combined heat and power plants (CHP) can contribute significantly to the compensation of these fluctuations and to the relief of the electricity networks. For this purpose, however, a control system for the CHP plants is necessary, which ensures both the coverage of the heat demand of the building as well as to the exact timing of the electrical energy production with respect to the times when it is needed. The decoupling of electricity generation and coverage of the heat demand can be achieved by the existing heat storage tank. This therefore constitutes the central element of the control system to be developed and tested in the context of the research project.

As part of this interim report the results of the 2nd of the three years research project are presented. In detail, the work packages prognosis, determination of the energy content in the heat storage tank, control system for an optimal electricity production, characteristics of the field test facilities, simulation and social science research are described.

As an outcome of the extensive work to generate heat and electricity demand forecasts, it was found that the naive forecast based on the acquisition of the data of the previous days shows a quality, which can hardly be improved by more detailed methods, due to the strong influence of the individual user behavior. In order to determine the energy content in the heat storage tank, a sigmoid function was established to describe the temperature profile in the tank. Here, the difficulty was to adjust the four parameters of the Sigmoid function to the three temperature measurements available. However, by applying appropriate boundary conditions, this problem could be solved. The control system for an optimal electricity production of the CHP unit uses the curves for heat demand at minimum and maximum energy content in the heat storage tank as limitations. By this means the coverage of the heat demand can be ensured at any time. The two field test units available for the project were retrofitted with additional measurement sensors and control hardware for implementation and testing of the new control system. The simulation model was extended with respect to different configurations of the heat storage tank, and the model was verified and calibrated based on data collected at the University's CHP test stand. Within the social science research, the barriers for a wide distribution of cogeneration were studied.

1 Einleitung

Die Beantwortung der Frage nach dem Ausgleich der immer größer werdenden Anteile fluktuierender Stromerzeugung auf Basis der erneuerbaren Energieträger Sonne und Wind wird in letzter Zeit immer dringlicher. Damit einhergehend muss geklärt werden, wie eine sichere Versorgung mit elektrischer Energie gewährleistet und, vor allem, finanziert werden kann. Es scheint klar zu sein, dass zu diesem Zweck eine tiefgreifende Änderung des Strommarktes erfolgen muss, und erste Diskussionsvorschläge dazu sind jüngst in einem Grünbuch seitens des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie veröffentlicht worden [BMW14]. Des Weiteren ist die Problematik des Netzausbaus nicht geklärt; „Stromautobahnen“ zur Durchleitung des an den deutschen Küsten erzeugten Windstroms zu den Verbrauchern in Süddeutschland stoßen in der Bevölkerung auf wenig Zustimmung, so dass bereits Teile der Politik diese Lösung ablehnen [KÖG14].

Einen Lösungsansatz stellt die Dezentralisierung der zukünftigen Stromversorgung dar verbunden mit dem sogenannten zellulären Ansatz, der u.a von Prof. Weissmüller vertreten wird [TRI14, WEI12]. Demnach wird nicht nur die Stromversorgung, sondern die Energieversorgung allgemein auf lokaler Ebene zwischen Erzeugern und Verbrauchern unter Zuhilfenahme verfügbarer Energiespeicher weitest möglich ausgeglichen. Somit müssen nur die verbleibenden Überschüsse und Defizite auf der nächst höheren – regionalen – Ebene aggregiert und komplementär auf die lokalen Zellen zurückverteilt werden. Gleiches geschieht mit den Überschüssen und Defiziten auf regionaler Ebene, wobei hier die nächst höhere Ebene bereits durch die Landes- oder die nationale Ebene gebildet werden kann. Es ist offensichtlich, dass auf diese Weise die Netze bestmöglich entlastet werden, da dezentral erzeugte Energie zu allererst dezentral verbraucht wird und nur die Überschüsse über die Netze ausgetauscht werden müssen.

Diesem Ansatz folgt das vorliegende Forschungsprojekt, in dem das Gebäude als kleinste Einheit des zuvor beschriebenen zellulären Modells aufgefasst wird, und der durch Eigenerzeugung – hier auf Basis einer KWK-Anlage – produzierte Strom weitestgehend im Gebäude selbst verbraucht werden soll. Die dadurch entstehende Entlastung der Stromnetze wird durch eine vorausschauende Bewirtschaftung des Wärmespeichers der KWK-Anlage erreicht. Das bedeutet konkret, dass ein intelligentes Steuerungssystem dafür sorgt, dass der Wärmespeicher zu Zeiten hohen Strombedarfs entsprechende Aufnahmekapazitäten besitzt, so dass das KWK-Gerät zur Deckung des Strombedarfs anlaufen kann, selbst wenn der Bedarf für die parallel anfallende Wärme momentan nicht oder nicht vollständig gegeben ist. Dabei erscheint naheliegend, dass die Stromanforderung nicht allein auf den gebäudeinternen Bedarf beschränkt sein muss, obwohl das Projekt zunächst darauf ausgerichtet ist; in gleicher Weise kann auf eine von außen aufgeprägte Bedarfsanforderung reagiert werden. Auf diese Weise ist das Steuerungssystem letztendlich in der Lage, KWK-Anlagen am allgemeinen Strombedarf orientiert zu betreiben und damit einen Beitrag zur Lösung des eingangs erwähnten Problems der fluktuierenden Stromerzeugung auf Basis der erneuerbaren Energieträger Sonne und Wind zu leisten.

Im folgenden Bericht sind die Tätigkeiten und Ergebnisse des 2. Jahres des insgesamt auf 3 Jahre angelegten Projektes zusammengefasst. Im Einzelnen werden die Arbeiten zur Erstellung von Wärme- und Strombedarfsprognosen, der Berechnung der im Wärmespeicher vorhandenen Energie auf Basis der äußeren Temperaturmesswerte, das Steuerungskonzept, die Vorbereitung der Feldtestanlagen sowie der Stand der Simulation beschrieben. In einem letzten Abschnitt sind zudem die Ergebnisse der sozial-wissenschaftlichen Begleitforschung, die sich mit den Hemmnissen der KWK befasst, zusammengestellt.

2 Stand der Forschungsarbeiten

2.1 Prognose

Wie im ersten Zwischenbericht erläutert wurde, soll neben der Ad-Hoc Strategie zur stromoptimierten Betriebsführung von KWK-Anlagen eine auf Energiebedarfsprognosen basierte Betriebsführungsstrategie entwickelt werden, um anschließend beide Strategien kombinieren zu können. Ziel der Prognose ist die Vorausplanung der KWK-Laufzeiten für den nachfolgenden Tag, um eine möglichst hohe elektrische Deckung zu erzielen. Als Einflussparameter für die Prognose wurden neben den Verbrauchswerten der Vergangenheit auch aktuelle Randbedingungen wie Wetterdaten, Jahreszeit, Wochentag und individuelles Nutzerverhalten untersucht. Um Abhängigkeiten zu erkennen und daraus Prognosestrategien zu entwickeln, wurden die ebenfalls im letzten Statusbericht vorgestellten realen Verbrauchsdaten von 6 Wohngebäuden mit maximal 9 Bewohnern analysiert, die für den Zeitraum von einem Jahr in einer zeitlichen Auflösung von einer Minute vorliegen.

Vergleichsgrundlage für die analysierten Ansätze ist die naive Prognose, bei der angenommen wird, dass der zu prognostizierende Tag einen identischen Lastgang aufweist wie der vorhergehende. McLoughlin, Duffy und Conlon haben sich in mehreren Veröffentlichungen mit Strombedarfsprognosen für einzelne

Wohneinheiten auseinandergesetzt, und dabei herausgefunden, dass im Gegensatz zu kumulierten Stromverbrauchskurven einzelne Wohneinheiten durch sporadisch auftretende Verbräuche gekennzeichnet sind. McLoghlin et al. [MCL13] stellen dabei unterschiedliche Methoden zur Zeitreihenvorhersage wie Fourierreihen, Neuronale Netze, Regressionen und Gaußprozesse für die Strombedarfsprognose vor. Gaußprozesse sind nur für Prognosen über kurze Zeiträume ($<1\text{h}$) geeignet und werden daher nicht verfolgt. Einen anderen Ansatz verfolgen Widén et al., in dem sie den Strombedarf durch Tätigkeitsberichte nachbilden [WID09]. Dieses Prognoseverfahren erfordert allerdings das Festlegen der Tätigkeiten für den nachfolgenden Tag inklusive der entsprechenden Zeitangaben, was für die Bewohner einen nicht zumutbaren Aufwand bedeutet. Im Projektbericht der LichtBlick AG [LIC12] wird ein Prognoseverfahren vorgestellt, das sich an die VDI-Richtlinie 4655 anlehnt und festgelegte Typtage zur Prognose nutzt.

Als erster Schritt in der Prognose der Lastgänge wird die Vorhersage der Tagesenergiebedarfe untersucht. Hierfür sind die oben beschriebenen Einflussparameter zu prüfen. Für Wochentage und Sonnenstunden sind keine signifikanten Abhängigkeiten in den Untersuchungsdaten sowohl beim Strom- als auch beim Wärmebedarf erkennbar. Bei der Hälfte der Untersuchungsobjekte ist dagegen eine signifikante Temperaturabhängigkeit des Tagesstrombedarfs erkennbar, die anderen Häuser weisen diese jedoch nicht auf. Beim Wärmebedarf ist für alle Häuser ein signifikanter Zusammenhang zwischen Wärmebedarf und Temperatur gegeben. In Abbildung 1 sind die Tagesverbräuche an Wärme (Heizung und Warmwasser) über der mittleren Tagesaußentemperatur aufgetragen. Die Abhängigkeit zur Außentemperatur ist bis zur Heizgrenztemperatur, die bei ca. $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt, erkennbar. Obwohl für alle Häuser dieser Zusammenhang klar ersichtlich ist, wird auch deutlich, dass der Wärmebedarf nicht ausschließlich von der Außentemperatur abhängig ist, sondern diese Abhängigkeit lediglich einen Trend mit erheblicher Streubreite vorgibt.

Auf Basis dieser Erkenntnisse ist nun zu prüfen, wie der Tagesenergiebedarf prognostiziert werden kann. Da bei der elektrischen Energie keine signifikanten Abhängigkeiten von weiteren Größen ermittelt werden konnten, muss diese mit einer naiven Prognose vorhergesagt werden. Für die Wärmeprognose wurden mehrere Prognoseansätze für den Gesamtwärmebedarf untersucht. Als Vergleichsgröße wurde der mittlere Fehler aller Tage für jedes Haus sowie über alle Häuser gebildet und verglichen. Hier zeigte sich, dass mit der naiven Prognose (Tagesenergiebedarf = Vortagesenergiebedarf) eine nur schwer zu verbessernde Prognose erstellt wird. Andere Ansätze, die die Außentemperatur berücksichtigen, konnten zwar für manche Häuser leichte Verbesserungen erzielen, benötigen jedoch einen höheren Aufwand und höheren

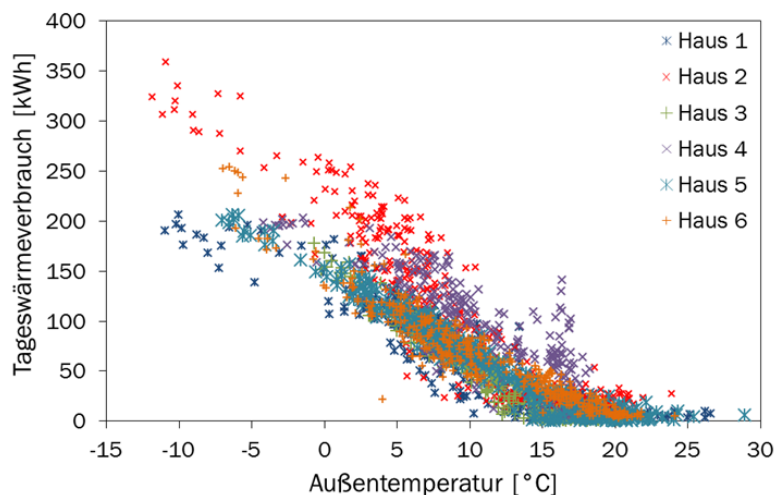


Abbildung 1: Temperaturabhängigkeit des Tageswärmebedarfs

durch anhand einer Funktion beschreiben, und zweitens werden die durch die geringe Auflösung der in den untersuchten Gebäuden verwendeten Energiezähler auftretenden stochastischen Verläufe geglättet. Ziel der Fourieranalyse ist es, im ersten Schritt normierte Tagesprofile zu erstellen, die Typtagen, das sind Tage mit ähnlichen Merkmalen wie Jahreszeit, Außentemperatur, Wochentag, zugeordnet werden können. Beim elektrischen Verbrauchsprofil waren die Tage allerdings so unterschiedlich, dass eine Zuordnung zu Typtagen nicht möglich war. Für die Wärme ließen sich dagegen für die Winterzeit zwei Fourier-transformierte normierte Tagesprofile ermitteln, welche in Abbildung 2 (links) mit schwarzen Linien dargestellt sind. Die normierten Leistungsprofile im Sommer lassen sich aufgrund der zueinander verschobenen Maxima dagegen nicht durch ein Profil darstellen, wie Abbildung 2 (rechts) eindeutig belegt. Daher kann ein Verfahren auf Basis von Typtagen zur Prognose nicht verfolgt werden.

messtechnischen Vorlauf zur Ermittlung von Funktionskonstanten. Aufgrund des hohen Aufwands und der geringen Verbesserungen wird der Tagesenergiebedarf deshalb sowohl für Strom als auch für Wärme auf Basis der Vortage prognostiziert.

Um den zeitlichen Verlauf der Last über den Tag zu kennen, muss zudem ein Tageslastprofil prognostiziert werden. Zu diesem Zweck werden die gemessenen Lastgänge mit Hilfe einer Fourieranalyse abgebildet, was zwei Vorteile bietet: Erstens lassen sich die Tagesprofile da-

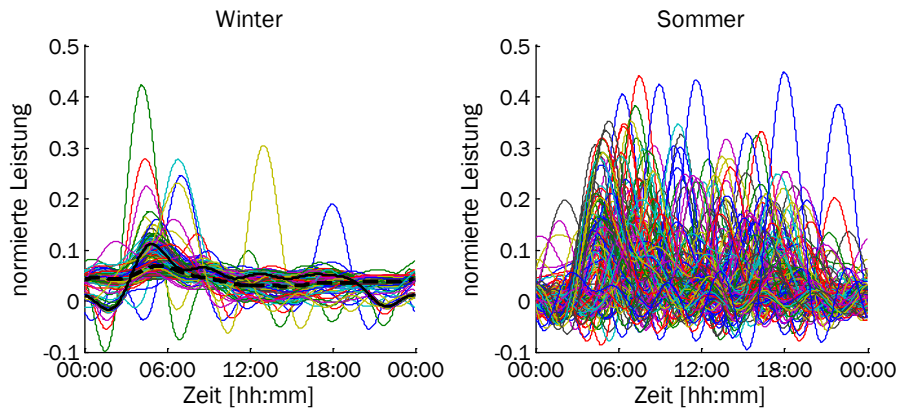


Abbildung 2: Fouriertransformierter Tageswärmebedarf aufgeteilt in Winter (Oktober bis April) und Sommer (Mai bis September)

Da sich schon bei der Vorhersage der Tagesenergiebedarfe gezeigt hat, dass die Prognose auf Grundlage des Vortags mit deutlich aufwendigeren Verfahren konkurrieren kann, wird auch hier die Prognose des Tagesverlaufs auf Grundlage der vorhergehenden Tage untersucht. Für die Untersuchung sind neben dem Vortag auch die davorliegenden Tage berücksichtigt worden. Dies wird mit zwei Ansätzen verfolgt: Einerseits mit gemittelten Minutenwerten der Tage (vgl. Gl. 1), andererseits mit einer linear abfallenden Gewichtung der Vortage (vgl. Gl. 2).

$$P_{i,d} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n P_{i,d-j} \quad (\text{Gl. 1});$$

$$P_{i,d} = \sum_{j=1}^n \frac{n+1-j}{\frac{n}{2}(n+1)} \cdot P_{i,d-j} \quad (\text{Gl. 2})$$

mit i: Minute des Tages, j: Abstand zum Tag d, n= Anzahl berücksichtigter Vortage.

Die Analysen der verschiedenen Prognosestrategien haben gezeigt, dass die Lastgänge sowohl zeitlich (von Tag zu Tag) als auch räumlich (zwischen verschiedenen Gebäuden) sehr stark variieren können, was von Tzscheuschler [Tzs14] und McLoughlin et al. [MCL13] bestätigt wird. Im Rahmen einer Masterarbeit wird derzeit im Projekt die Prognose mittels neuronaler Netze untersucht. Die bisherigen Ergebnisse bestätigen jedoch die Schwierigkeiten bei der Vorhersage der Nutzereinflüsse, und sie führen zu schlechteren Ergebnissen, als sie durch die naive Prognose auf Basis der Vortageswerte erzeugt werden können. Für die Prognosestrategie und das Steuerungskonzept bedeutet dies, dass aufgrund des nicht vollständig vorher-sagbaren Nutzerverhaltens die Möglichkeit bestehen muss, infolge nicht prognostizierter aktueller Ereignisse vom Fahrplan abweichen zu können.

2.2 Bestimmung des Energieinhalts von Wärmespeichern mittels sigmoidaler Approximation

Zur Realisierung des stromoptimierten Betriebs von KWK-Anlagen ist es erforderlich, Kenntnis über den energetischen Zustand des von der KWK-Anlage gespeisten Wärmespeichers zu erlangen. Nur so ist eine Bewirtschaftung möglich, die neben der vollständigen Deckung des Wärmebedarfs auch die Verfügbarkeit des Speichers als Wärmesenke in Zeiten hohen Strombedarfs im Objekt sicherstellt. Zur Bestimmung des energetischen Zustands in Wärmespeichern findet weitestgehend das sogenannte Schichtenmodell Verwendung. Bei dieser Methode wird die Temperatur in verschiedenen Höhen des Speichers gemessen und der Energiegehalt abschnittsweise berechnet. Nachteilig ist hierbei, dass bei einer herstellerseitig geringen Anzahl vorgesehener Temperaturmessstellen Abweichungen von über 20% in Bezug auf die nutzbare Energiemenge zu Ungenauigkeiten führen, die die Möglichkeiten für einen stromoptimierten Betrieb der Anlage einschränken.

Untersuchungen an thermischen Speichern haben ergeben, dass der Verlauf der Temperatur über die Speicherhöhe bei Ausbildung einer Temperaturmischzone in guter Näherung durch eine S-Kurven-Funktion beschrieben werden kann. Zur mathematischen Beschreibung dieser Verläufe haben sich die Funktionen aus der Gruppe der Sigmoidfunktionen als praktikabel erwiesen [WEH12]. Hierbei war jedoch immer die Anzahl der zur Approximation benötigten Temperaturmessstellen größer als üblicherweise von den Speicherherstellern verbaut. In der Arbeit von Wehmhörner wurden zur Bestimmung des Kurvenverlaufs beispielsweise sieben Fühler verwendet. Versuche mit Kältespeichern haben außerdem gezeigt, dass die Reduzierung des zugelassenen Wertebereichs der Kurvenparameter zu einem besseren Konvergenzverhalten der Approximation führt [WAL10]. Ziel muss es daher bei der Anwendung dieser Funktionen sein, die Verringerung der Messstellen auf die übliche Anzahl von drei Temperaturfühlern bei gleichzeitig genauerer Energiebestimmung gegenüber dem Schichtenmodell zu erreichen.

In Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass mit verschiedenen Sigmoidfunktionen gute Approximationsergebnisse erzielt werden können. Die Logistikfunktion ist eine mögliche Funktion aus der Gruppe der Sigmoiden, die den Temperaturverlauf im Speicher abbilden kann. Als nachteilig erweist sich jedoch, dass unterschiedliche Temperaturgradienten zwischen unterer und oberer Grenzschicht während des Ladens bzw. Entladens des Speichers aufgrund der Funktionssymmetrie keine Berücksichtigung finden können. Abhilfe kann an dieser Stelle die Verwendung der Gompertzfunktion schaffen. Durch den asymmetrischen Verlauf dieser Funktion ist es möglich, beim Entladen des Speichers im unteren Grenzschichtbereich einen stärkeren Anstieg des Gradienten zu erzielen, wohingegen die Funktion durch Invertieren beim Beladen im oberen Bereich des Speichers schneller gegen die Asymptote läuft. Abbildung 3 zeigt den Verlauf der Gompertzfunktion, welche grundsätzlich definiert ist durch $y = a * e^{(-e^{k_1 * x})}$. Um die Funktion in x- und y-Richtung zu verschieben, werden zwei weitere Parameter eingeführt, sodass die dargestellte Funktion durch $y = A_{1+} a * e^{(-e^{k_1 * (x-x_c)})}$ beschrieben werden kann.

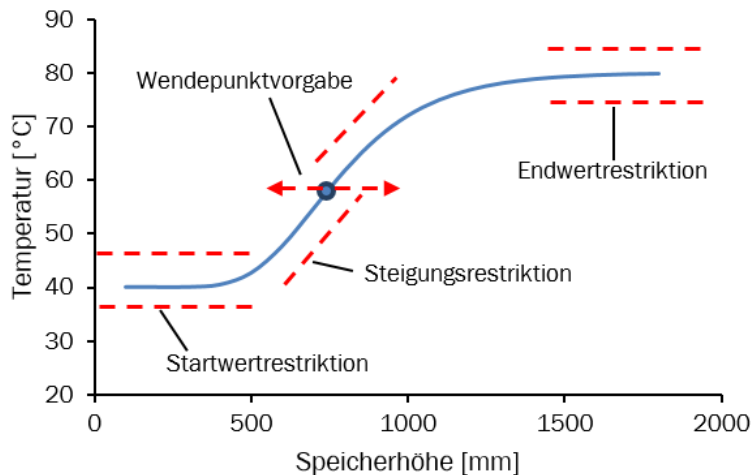


Abbildung 3: Sigmoidfunktion mit Restriktionen zur Approximation

erzielen, werden Restriktionen für den Approximationsalgorithmus definiert. Diese begrenzen den möglichen Wertebereich der Funktion hinsichtlich der oberen und unteren Grenztemperaturen sowie der Vorgabe des Funktionswendepunktes und der in diesem Bereich tolerierten Steigungen. Damit ist es möglich, plausible Ergebnisse mit nur drei Messstellen zu erzielen, obwohl die mathematische Bestimmtheit der Funktion mit vier Parametern nicht gegeben ist. Abbildung 4 zeigt einen approximierten Temperaturverlauf mit den drei zur Berechnung verwendeten Messstellen sowie die sieben zur Validierung verwendeten Vergleichstemperaturen. Es wird deutlich, dass der Kurvenverlauf dem durch die sieben Fühler beschriebenen Temperaturverlauf in guter Näherung entspricht.

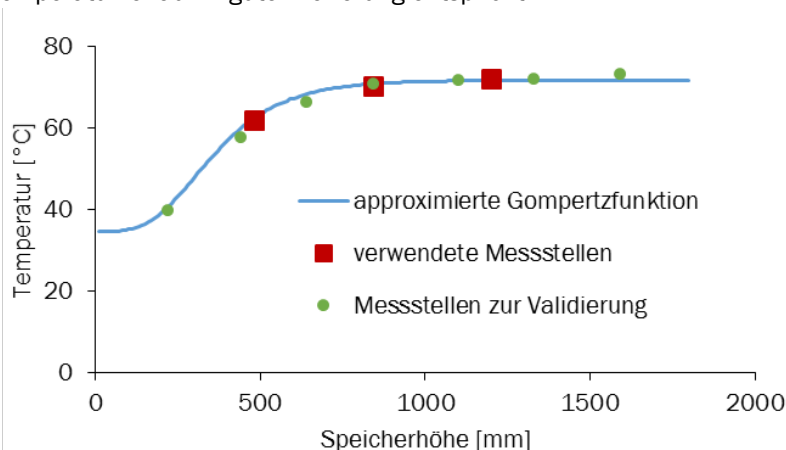


Abbildung 4: Approximierter Speichertemperaturverlauf

Approximationsalgorithmus für jeden Messwert im 10-Sekunden-Intervall ausgeführt. Neben den schon beschriebenen Restriktionsfunktionen kamen zusätzliche Restriktionen zum Tragen, welche die Veränderung der Funktionswerte der Sigmoiden zwischen zwei Messzeitpunkten begrenzen. Das Ergebnis der aus den Sigmoidapproximationen berechneten Speicherenergien gegenüber der Raumtemperatur ist in

Zur Überprüfung des Approximationsverhaltens der Gompertzfunktion werden zunächst 7 Temperaturmessstellen am Speicher verwendet. Hier zeigt sich durchweg eine gute Konvergenz des zur Anpassung der Parameter verwendeten Nelder-Mead-Algorithmus. Reduziert man die berücksichtigten Messstellen auf die vom Hersteller verbauten drei Fühler, ergeben sich jedoch stark fehlerbehaftete Approximationsergebnisse, die den tatsächlichen Temperaturverlauf nicht mehr richtig abbilden.

Um dennoch Ergebnisse mit akzeptabler Abweichung vom tatsächlichen Temperaturverlauf zu

Zur weiteren Validierung des Verfahrens wurde ein 24-Stunden-Versuch in Verbindung mit einem Vaillant ecoPower4.7 BHKW und einem 750l-Speicher nach DIN 4709 durchgeführt. Bei dieser Messung zur Bestimmung des Normnutzungsgrades von Mikro-KWK-Geräten wird ein repräsentatives Wärmelastprofil aufgeprägt. Die sich einstellenden thermischen Zustände im Speicher entsprechen deshalb etwa denen, die auch im Praxisbetrieb zu erwarten sind.

In der Auswertung zu diesem Versuch wurde der bereits erprobte

Abbildung 5 dargestellt. Daneben ist der Energieinhalt auf Basis von drei sowie sieben Fühlern mittels des Schichtenmodells aufgetragen. Nimmt man die aus sieben Fühlern errechnete Speicherenergie als Referenz, so wird deutlich, dass der aus drei Fühlern errechnete Verlauf, gerade bei entladenen Speicher, starke Abweichungen aufweist. Das Sigmoidmodell ist in diesen Bereichen robuster und folgt der Referenzkurve mit geringen Abweichungen. Je nach Ladezustand wurden zur Approximation unterschiedliche Randbedingungen festgelegt. Dabei ist innerhalb der grün hinterlegten Bereiche eine deutlich verbesserte Genauigkeit bei der Bestimmung der Speicherenergie gegenüber dem Schichtenmodell mit drei Fühlern erzielt worden. Grenzen weist das Sigmoidverfahren mit drei Messstellen insofern auf, als dass es die Speicherzustandsbestimmung noch nicht lückenlos ermöglicht. Dabei stellen sich insbesondere Speicherzustände als schwer approximierbar heraus, in denen die Temperaturen in der Mitte des Speichers sehr eng beieinander liegen. Hier sind bisher keine idealen Randbedingungen für den Approximationsalgorithmus gefunden worden. Ein Lösungsansatz kann jedoch sein, die entsprechenden Bereiche aufgrund der absoluten Temperaturwerte zu identifizieren und an diesen Stellen gemittelte Ergebnisse aus zwei Berechnungen mit solchen Restriktionen zu verwenden, die zu Ergebnissen mit sich ausgleichenden Abweichungen führen. Als Rückfalloption bietet es sich in diesen Bereichen zudem an, den aus drei Fühlern ermittelten Wert zu verwenden und mit einem Korrekturfaktor zu belegen.

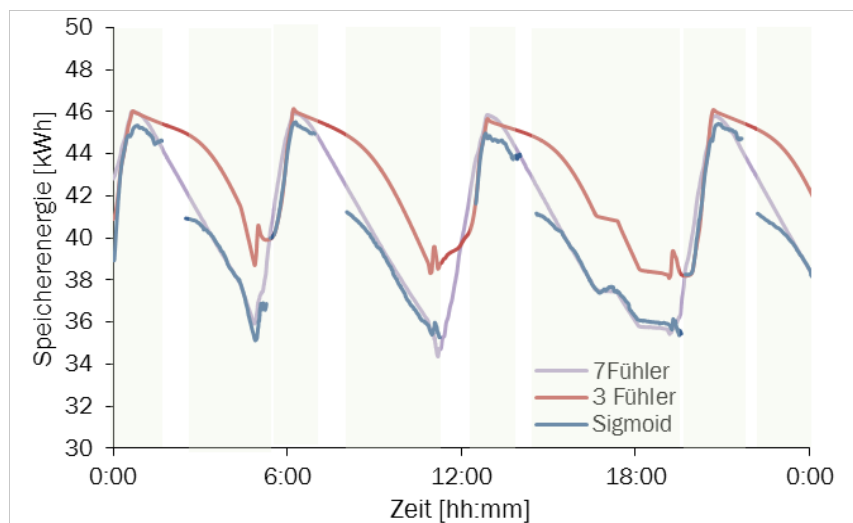


Abbildung 5: Speicherenergieberechnung während 24h-DIN-Versuch

2.3 Stromoptimierte Steuerung und Fahrplanerstellung

Um eine KWK-Anlage stromoptimiert betreiben zu können, ist die Entwicklung einer geeigneten Steuerlogik erforderlich. Bereits in der ersten Projektphase wurden die Elemente einer solchen Steuerung konzeptionell beschrieben und in einzelne Module aufgeteilt. Neben den beiden wichtigen Modulen *Prognose* und *Speicherzustandsbestimmung* ist ein zentraler Baustein der Steuerung die Erstellung eines *stromoptimierten Fahrplans*.

Basierend auf den Daten einer 24h-Bedarfsprognose für Strom und Wärme im versorgten Objekt wird daher nach einer Lösung gesucht, wie die Anlage unter den gegebenen physikalischen Randbedingungen ideal betrieben werden kann. Randbedingungen für die Optimierung sind dabei durch die prognostizierten Bedarfe und durch die Kapazität des Wärmespeichers sowie die im Speicher verfügbare Energie gegeben. Weiterhin fließen Randbedingungen wie minimale Laufzeiten, Stillstandphasen oder die maximale Anzahl der Starts ein, die durch das BHKW selbst vorgegeben werden.

Abbildung 6 stellt ein wärmegeführtes Betriebsverhalten und das eines stromoptimierten Fahrplans gegenüber. Dazu sind die kumulierten Wärmebedarfskurven jeweils bei minimal und bei maximal beladenem Wärmespeicher über der Zeit aufgetragen. Diese Kurven begrenzen den möglichen Betriebsbereich des BHKWs. Dem entsprechend ist dazwischen der Verlauf der Wärmeerzeugung durch das BHKW zu erkennen, und zwar einmal bei wärmegeführtem und einmal bei stromoptimierten Betrieb. Die um 0:00 Uhr verfügbare Restenergie im Speicher stellt den Startwert der Kurven mit der Energie vom Vortag dar und beträgt in diesem Fall 50% der thermischen Speicherkapazität.

Es wird deutlich, dass beide Varianten durch die minimale und maximale Wärmeenergie im Speicher nach unten und oben begrenzt sind, da das BHKW grundsätzlich bei leerem Speicher ein- und bei vollgeladenem Speicher ausschalten muss. Unterschiede ergeben sich in den Ein- und Ausschaltzeitpunkten für das BHKW. Diese werden mittels eines Optimierungsalgorithmus so gewählt, dass die grün dargestellten

Flächen des selbstgenutzten Stromanteils innerhalb der gegebenen Randbedingungen maximal werden. Gegenüber den orangenen Flächen des wärmegeführten Betriebs wird daher eine Steigerung des Eigenstromanteils bei gleicher Wärmedeckung erzielt. Dieses Verfahren bietet weiterhin die Möglichkeit, unter Berücksichtigung der jeweiligen Betriebskosten von BHKW und Spitzenlastkessel eine kostenorientierte Optimierung durchzuführen.

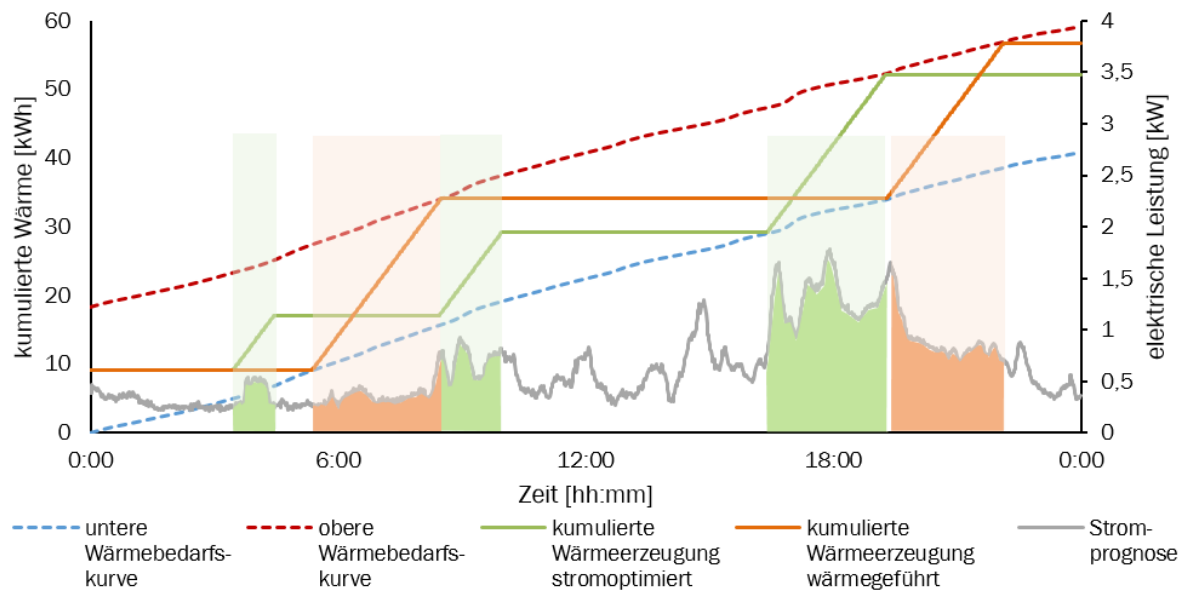


Abbildung 6: Optimierter Fahrplan unter Berücksichtigung von Strom- und Wärmebedarfsprognosen

2.4 Inbetriebnahme der Feldtestanlagen

Um das entwickelte Steuerungskonzept an realen Anlagen im Feld zu testen, wurden zwei bereits bestehende KWK-Anlagen mit der nötigen Hardware zur Steuerung und zur Messdatenerfassung erweitert. Die beiden ausgewählten Anlagen bilden dabei unterschiedliche Gebäude- sowie BHKW-Typen ab. Die erste Anlage versorgt eine Doppelhaushälfte, die sich auf dem Betriebsgelände der FairEnergie GmbH (Stadtwärke Reutlingen) befindet und als Wohngebäude genutzt wird. Als KWK-Gerät kommt ein Vaillant ecoPower 1.0 mit 1 kW elektrischer sowie 2,5 kW thermischer Leistung in Kombination mit einem 750l-Wendelspeicher zum Einsatz. Das zweite Objekt ist ein Wohn- und Gewerbegebäude in Ofterdingen mit einer Wohneinheit sowie zwei kleinen Gewerbeeinheiten, wovon eine der Einheiten lediglich mit der von der KWK-Anlage erzeugten elektrischen Energie, die andere Einheit ausschließlich mit Wärme versorgt wird. Das eingesetzte BHKW ist hier ein Senertec Dachs SE G5.5 in Verbindung mit einem 900l-Wendelspeicher, welches im Regelfall ohne Zusatzkessel betrieben wird. In Tabelle 1 sind die charakteristischen Daten beider Anlagen zusammengestellt.

Tabelle 1: Charakteristische Daten der Feldtestanlagen

	Feldtestanlage 1 – Reutlingen	Feldtestanlage 2 - Ofterdingen
Gebäude-Typ	Doppelhaushälfte mit 1 Wohneinheit	Freistehendes Gebäude mit 1 Wohneinheit sowie 2 kleinen Gewerbeeinheiten
BHKW	Vaillant ecoPower 1.0	Senertec Dachs SE G5.5
Leistung elektrisch	1 kW	5,5 kW
Leistung thermisch	2,5 kW	14,8 kW (mit Brennwert-Kondensator)
Speicher	750 l-Wendelspeicher	900 l-Wendelspeicher
Zusatzkessel	20 kW	nicht in Betrieb

Um zum einen den Istzustand des wärmegeführten Betriebs möglichst genau zu erfassen und zum anderen eine ausreichende Datenbasis zur Implementierung des stromoptimierten Betriebs zu erhalten, war es erforderlich, verschiedene Verbrauchszähler nachzurüsten. Bei der ersten Anlage war im Ausgangszustand bereits eine große Anzahl an Zählern vorhanden, sodass hier lediglich ein neuer Zweirichtungs-Stromzähler erforderlich war, um den Nettostrombezug des Wohngebäudes zu erfassen. Im zweiten Objekt mussten

dagegen neben zwei Zweirichtungs-Stromzählern drei Wärmemengenzähler zusätzlich installiert werden. Die Wärmespeicher wurden in beiden Anlagen mit jeweils sieben zusätzlichen Thermoelementfühlern ausgestattet, um eine genaue Bestimmung des Speicherenergieinhalts parallel zur Sigmoidmethode zu ermöglichen. Zur Messdatenerfassung und Steuerung kamen jeweils SPS-Controller der Firma WAGO zum Einsatz, welche mittels VPN-Routern durch sichere Verbindungen aus dem Netzwerk der Hochschule ferngewartet werden können. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die in beiden Anlagen zum Messen und Steuern verbaute Hardware.

Die Kommunikation zwischen SPS und Steuerungs-PC erfolgt über drei lokale Adresskreise hinweg. Adresskreis 1 ist physisch durch das bestehende Netz am Standort des Steuerungs-PCs definiert. Der zweite und dritte Adresskreis werden an der Anlage vor Ort genutzt, wobei Adresskreis 3 das LAN der Feldtestanlage darstellt. Die Kommunikation zwischen SPS und BHKW findet mittels des BHKW-eigenen Webservers statt. Dieser wird von der SPS über CGI-Befehle angefragt, sofern sich die SPS und das BHKW im selben Adresskreis befinden. Neben den vom BHKW ausgelesenen Speichertemperaturen und anderen aktuellen Betriebsparametern können über die Schnittstelle auch Befehle zum Ein- bzw. Ausschalten des BHKWs übertragen werden. Ein zusätzlicher potentialfreier Kontakt zur Stromanforderung ist daher nicht erforderlich.

Tabelle 2: Installierte Hardware zur Erfassung der Messdaten

	Feldtestanlage 1 – Reutlingen	Feldtestanlage 2 - Ofterdingen
Steuerung / Hardware	WAGO SPS PFC-200	WAGO SPS PFC-200
Netzwerkrouter	eWon Cosy VPN-Router	Innominate mGuard RS2000
Wärmemengenzähler	4 Zähler (M-Bus)	3 Zähler (M-Bus)
Stromzähler	2 Ein-Richtungszähler, 1 Zwei-Richtungszähler (jeweils Umsetzung S0 auf M-Bus)	2 Zwei-Richtungszähler (M-Bus)
Gaszähler	2 Gaszähler (Umsetzung S0 auf M-Bus)	---
Temperatursensoren	7 Speicherfühler, 1 Außentemperaturfühler	7 Speicherfühler, 1 Außentemperaturfühler

In beiden Anlagen dient die SPS in erster Linie der Erfassung und Zwischenspeicherung der Anlagendaten sowie dem Datenaustausch mit der BHKW-Schnittstelle. Die Visualisierung und die Steuerung des Betriebsverhaltens werden hingegen in der Programmiersprache *LabVIEW* auf einem zentralen Steuerungs-PC umgesetzt, welcher über das Datenprotokoll *Modbus TCP* mit der SPS kommuniziert. Dies ermöglicht zum einen eine komfortable Datenvisualisierung sowie Speicherung, zum anderen können rechenintensive Algorithmen zur Optimierung in Form von C-Code eingebunden werden.



Abbildung 7: BHKW der zweiten Feldtestanlage mit Speicher, Steuerungsbox und PC

Um die Daten zentral auf dem Steuerungs-PC zu sichern, werden diese minütlich in Dateien abgelegt. Bei Ausfall der Verbindung zwischen Steuerungs-PC und SPS werden die anfallenden Daten in einem lokalen Speicher abgelegt und bis zur Wiederaufnahme der Verbindung, maximal jedoch eine Woche, vorgehalten. Neben weiteren Funktionen zur BHKW-Steuerung und Visualisierung umfasst die LabVIEW-Software Programmbausteine zur Speicherzustandsbestimmung.

Beide Steuereinheiten sind betriebsbereit und zeichnen die anfallenden Daten seit August 2014 in Reutlingen sowie seit Dezember 2014 in Ofterdingen fortlaufend auf. Mit den Daten werden zum einen die entwickelten Prognosestrategien verifiziert, zum anderen können die Anlagen auf Grundlage der Messdaten mittels des erstellten Simulationsmodells abgebildet werden.

2.5 Simulation

Das im letzten Zwischenbericht beschriebene Simulationsmodell zur Prüfung der entwickelten Regelstrategien wurde weiterentwickelt und steht jetzt für die Simulation der Feldtestanlagen zur Verfügung. Im Ein-

zelen konnte das bestehende Simulink-Modell dank der Einbindung der Carnot-Toolbox auf variable Zeitschritte erweitert werden. Weiter wurden die für die Prognose zur Verfügung gestellten Messdaten als Bedarfswerte hinterlegt, womit realistische Bedarfsprofile eingebettet sind. Zur Verifikation des Modells sind am BHKW-Prüfstand Lade- und Entladezyklen mit verschiedenen BHKW und verschiedenen Speichergrößen und -typen durchgeführt worden. Diese Versuche sind zumeist gemäß der DIN 4709 erfolgt, nach welcher der Jahresnutzungsgrad von KWK-Anlagen auf Basis eines 24Stunden-Lastprofils und unter Einbindung des Wärmespeichers bestimmt wird.

Im Ergebnis zeigte sich, dass die Übertragung des Simulationsmodells auf unterschiedliche Speichergrößen zu bewerkstelligen ist. Interessant war jedoch der Abgleich des Modells mit den zwei grundsätzlichen Typen von Wärmespeichern, die in KWK-Anlagen eingesetzt werden. Dabei handelt es sich zum einen um Wärmespeicher ohne Systemtrennung, die eine Vermischung von BHKW- und Heizkreis zulassen und die auf diese Weise gleichzeitig als hydraulische Weiche fungieren. Zum anderen werden Wärmespeicher mit Systemtrennung eingesetzt, in denen das Medium des BHKW-Kreises im Inneren eines Wendelrohrs durch den Speicher geführt wird. Dieser Speichertyp wird bevorzugt eingesetzt, wenn das BHKW gegen Verschmutzungen aus dem Heizkreis geschützt werden soll. Für die Simulation ist es erforderlich, die beiden Speichertypen durch die Verwendung unterschiedlicher Unterprogramme im Gesamtmodell abzubilden. Auf Basis der Ergebnisse am Prüfstand konnten diese jeweils geeignet parametrisiert und abgeglichen werden, so dass nun die Simulation beider Speichertypen mit guten Ergebnissen möglich ist.

Im Hinblick auf die Prüfung und Optimierung der entwickelten Steuerung an den beiden Feldtestanlagen hat sich gezeigt, dass weitere, kleinere Änderungen im Simulationsmodell erforderlich sind. So ist beispielsweise an den Anlagen jeweils ein Warmwasserspeicher verbaut, im Simulationsmodell ist dagegen ein Trinkwarmwasserwärmetauscher eingebunden, so dass das Modell hier erweitert werden muss. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass die Kenndaten zur Beschreibung der Wärmespeicher insbesondere im Hinblick auf die Berechnung der Wärmeverluste jeweils neu angepasst werden müssen. Die Übernahme der Daten von den am Prüfstand vermessenen Speichern liefert nur unzureichende Ergebnisse. Sehr wichtig ist es zudem, die aktuellen Steuerparameter der Anlagen vor Ort in die Simulation einzupflegen. Dabei kommt es insbesondere darauf an, die Ansteuerung des Zusatzkessels exakt nachzubilden, da der Kesselbetrieb aufgrund der vergleichsweise großen Wärmeleistung die Temperaturen und Energien im Wärmespeicher massiv und rapide verändert.

2.6 Sozialwissenschaftliche Begleitforschung

Die Pläne der Bundesregierung sehen aufgrund der hohen Effizienz einen Ausbau des KWK-Anteils am deutschen Strommix bis zum Jahr 2020 auf 25 % vor. Um dieses Ziel zu erreichen, muss der Ausbau wesentlich beschleunigt werden, wofür die Wohnungswirtschaft aufgrund des hohen Wärmebedarfs das größte Potenzial bietet. Statistiken aus dem Wärmemarkt offenbaren jedoch ein geringes Wachstum des KWK-Anteils im Bereich der privaten Haushalte. So wurden im Jahr 2013 bei 686.500 verkauften Wärmeerzeugern [BDH14] mit 5.442 lediglich weniger als ein Prozent KWK-Anlagen (mit einer Leistung kleiner als 50 kW_{el}) angemeldet [BAF14]. Aus diesem Grund wurden Hemmnisse beim Einsatz von KWK-Anlagen in Wohngebäuden im Rahmen der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung untersucht. Die Ergebnisse sind nachfolgend zusammengefasst:

- Mangelnde Wirtschaftlichkeit bei Ein- und Zweifamilienhäusern
- Informationsdefizit, mangelnde Bekanntheit von Mikro-BHKW
- Hoher Verwaltungsaufwand und Bürokratie, komplexe Förderstruktur
- Hohe Investitionskosten
- Mangel an qualifizierten Handwerksbetrieben, die BHKW anbieten und installieren
- Gebäudetechnische Einschränkungen (keine Gasversorgung, mangelnde Stellfläche)
- Hoher Aufwand beim Stromverkauf an Mieter

Mögliche Maßnahmen zum Abbau dieser Hemmnisse sind Informationsveranstaltungen zur Bekanntmachung der Mikro-KWK oder kostenlose Machbarkeits-Checks als Impulsgeber. Darüber hinaus ist die Einführung einer Prüfpflicht für die Einsetzbarkeit von BHKWs bei Neubauten und Heizungsmodernisierungen zu erwägen.

3 Ausblick

Als nächste Aufgabe steht an, den Steuerungsalgorithmus auf den Feldtestanlagen zu implementieren, und diese nach den über den Algorithmus für die Eigenstromdeckung optimierten Fahrplänen zu betreiben, was für das Frühjahr 2015 geplant ist, da die Anlagen in der Übergangszeit erfahrungsgemäß die größte Flexibilität bieten. Parallel sollen die Feldtestanlagen im Simulationsmodell abgebildet werden, um die Optimierung des Steuerungsalgorithmus auf diese Weise zu unterstützen. In diesem Zusammenhang soll

auch die Strategie zur Berücksichtigung von Ad-hoc-Ereignissen, also einem unvermutet hohen Strombedarf im Objekt, entwickelt werden, da dieser Aspekt in der Prognose bislang noch nicht enthalten ist.

4 Literatur

- [BAF14] Bundesanstalt für Wirtschaft- und Ausfuhrkontrolle: Zulassung von KWK-Anlagen nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG), Datenstand 20.02.2014
- [BDH14] Bundesverband Deutschland Haus-, Energie- und Umwelttechnik e.V.: Bilanz Heizungsindustrie 2013
- [BMW14] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.): Ein Strommarkt für die Energiewende, Diskussionspapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Grünbuch), BMWi, Berlin, November 2014
- [CAR99] CARNOT Blockset - Conventional and Renewable eNergy systems OpTimization Blockset, Version 1.0, Solar-Institut Jülich, Nov. 1999
- [KÖG14] Kögler, A.: Seehofer lehnt Stromtrassen nun völlig ab, Energie&Management Powernews, 2.10.2014
- [LIC12] LichtBlick AG: Entwicklung und Markteinführung einer intelligenten Steuerung von Blockheizkraftwerken in Form eines virtuellen Kraftwerks zum Ausgleich schwankender Einspeisung erneuerbarer-Energien-Anlagen, 2012.
- [MCL13] McLoughling, Fintan, Duffy, Aidan, Conlon, Michael: Evaluation of time series techniques to characterise domestic electricity demand. Energy 50, S. 120-130, Dublin, 2013
- [TRI14] Trittner, G.: Verzicht auf fossile Brennstoffe machbar?, Heidenheimer Zeitung, 30.11.2014
- [TZS14] Tzscheutschler, Peter: Optimierung des Betriebs von kleinen KWK-Systemen durch Wärmespeicher, 8. Fachtagung Mini- und Mikro-Kraft-Wärme-Kopplung, Augsburg, 2014
- [WAL10] Waluyo, Joko; A Majid, M Amin: Temperature Profile and Thermocline Thickness Evaluation of a Stratified Thermal Energy Storage Tank, IJENS 2010
- [WEH12] Wehmhörner, Urs: Multikriterielle Regelung mit temperaturbasierter Speicherzustandsbestimmung für Mini-KWK-Anlagen, Dissertation, TU München, 2012
- [WEI12] Weissmüller, G.: Wie kommunale/regionale Energieversorgungskonzepte ökonomisch und ökologisch zusammenwachsen können, Vortrag, BioEnergy Decentral, Fachforum „Smart Energy“, Hannover, 16.11.2012
- [WID09] Widén, Joakim, Lundh, Magdalena, Vassileva, Iana, Dahlquist, Erik, Ellegård, Kajsa, Wäckelgård, Ewa: Constructing load profiles for household electricity and hot water from time-use data—Modelling approach and validation. Energy and Buildings 41, S.753-768, Uppsala, 2009